

doi: 10.5862/MCE.56.4

Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки

*Аспирант А.Б. Бондарев;**д-р техн. наук, заведующий кафедрой А.М. Югов,**Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

Аннотация. В статье выполнен расчет точности купольного шарнирно-стержневого покрытия и анализ сборочных отклонений по параметрам напряженно-деформированного состояния – по величинам начальных усилий. Определение отклонений осуществлено по положению узлов и стержней в пространстве относительно их проектных значений.

Рассмотрены две технологических схемы сборки купольного покрытия – от края к центру и от центра к краю. Расчет точности выполнен авторской компьютерной программой – вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» (ВК РАСК) – на персональном компьютере. Оценка напряженно-деформированного состояния купольного покрытия с учетом накопления сборочных отклонений выполнена методом конечных элементов в вычислительном комплексе SCAD.

Предложены конструктивные решения стыковки стержней и способ монтажа покрытия, направленные на повышение его несущей способности, живучести и собираемости.

Ключевые слова: большепролетные пространственные покрытия; шарнирно-стержневые системы; монтажные воздействия; сборочные отклонения; сборочные погрешности

Введение

Современные потребности общества требуют возведения покрытий зданий и сооружений с большими пролетами. Такие запросы связаны с необходимостью размещения большого количества людей, специальных производств, выставочных павильонов, бассейнов, крытых стадионов. При сборке большепролетных покрытий, как и многих других многоэлементных систем, неизбежно накапливаются отклонения. Возникновение и накопление отклонений в металлических статически неопределимых конструкциях приводит к изменению их напряженно-деформированного состояния (НДС), живучести [1] и собираемости [2]. Возможное изменение НДС покрытия при наличии отклонений может снизить несущую способность покрытия, собираемость и живучесть [3–7].

Учет и управление отклонениями в большепролетных покрытиях, а также борьба с ними на этапе проектирования – возможный резерв повышения несущей способности покрытия, повышения его живучести, собираемости и снижения трудоемкости возведения. Величины возможных отклонений при проектировании большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий являются исходными данными для разработки конструктивных мероприятий, например системы конструктивной компенсации отклонений. Кроме того, знание величин отклонений позволит оценить, а при необходимости снизить их влияние на несущую способность покрытия, а также управлять отклонениями в процессе монтажа. Активное управление отклонениями в покрытии в процессе возведения позволит снизить трудоемкость строительства всего объекта в целом.

1. Краткий обзор ранее выполненных исследований

Результаты исследований многих авторов, посвященных отклонениям, свидетельствуют, что отклонения снижают несущую способность конструкции. Значительное количество работ посвящено влиянию погнутости стержней – работы М. Д. Корчака [8], А. М. Югова [9]. Работы Г. Н. Колесникова [10] и другие посвящены исследованию влияния отклонений длин стержней от проектных размеров на поведение конструкции. В этих работах указывалось, что при случайных отклонениях в стержневых оболочках происходит снижение их несущей способности. Исследованием отклонений в многоэтажных зданиях занимались Н. И. Ватин [11], Д. В. Конин [12], В. Е. Сно [13] и многие другие.

Начиная с 70-х годов в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре технологии ракетно-космического машиностроения Л. А. Кашуба, В. А. Тарасов, С. В. Исаев занимаются вопросами отклонений формы элементов радиотелескопов, оболочек ракет [14, 15] и другими. В результате комплекса указанных работ, посвященных отклонениям, С. В. Исаев разработал методику расчета Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки

пространственной размерной цепи. Расчет точности [11] с использованием современных программных комплексов (к примеру, Solid Works) рассмотрен А. А. Алямовским [16]. Однако возможности современных программных комплексов размерного анализа (Solid Works, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D V12, PRO/ENGINEER WILDFIRE) не позволяют выполнить расчет точности пространственных размерных цепей с несколькими замыкающими звеньями. Современные программные комплексы размерного анализа не позволяют вычислить накопление отклонений в пространственных многоэлементных системах, т. к. в них рассматриваются размерные цепи с одним замыкающим звеном.

На современном этапе строительства требуется как никогда высокая скорость и точность определения НДС конструкций, возведения и сдачи их в эксплуатацию. Для удовлетворения всех этих требований требуется учет как возможных отклонений в конструкциях, так и других особенностей, присущих той или иной конструкции. Ошибки проектирования и неправильное определение НДС конструкций, неудовлетворительное качество возведения объектов строительства может привести к остановке производства или гибели людей [19]. Современные программные комплексы для расчета строительных конструкций позволяют определять НДС конструкций с учетом стадийности монтажа (SCAD, ЛИПА, Nastran, ANSYS) и многих других особенностей [18–20], но они не приспособлены для определения отклонений сборки с учетом их накопления.

В последнее время появились исследования, рекомендуемые для борьбы с отклонениями создавать управляемые конструкции, – работы В. И. Буякаса и А. С. Гвамичава [21]. Первые работы по управлению поведением строительных конструкций появились достаточно давно в сейсмостойком строительстве, например, работа И. И. Гольденבלата, Н. А. Николаенко, С. В. Полякова и С. В. Ульянова [22]. Для контроля поведения зданий и сооружений рекомендуют применять системы мониторинга [23]. В работах Н. П. Абовского [24], Charles R. Farrar [25], Chars J. Gantes [26], Gaul L. [27], Hasan R. [28], Kartal M.E. [29], Kaveh A. [30], Kohtaro Matsumoto [31], Ömer Keleşoğlu [32], Preumont A. [33], Tokunbo Ogunfunmi [34] предлагается создавать конструкции типа semi-active – конструкции с «полуактивным управлением», в том числе для борьбы с несовершенствами формы. Управление поведением конструкций применяется для повышения ее виброустойчивости и точности передачи возмущающих факторов, к примеру, радиоволн радиотелескопами и гелиоскопами – исследования Н. М. Kim [35], J. E. Pearson [36] и других.

2. Выделение не решенных ранее частей общей проблемы и анализ последних исследований

Давно известно, что сборочные отклонения снижают надежность и собираемость большепролетных стержневых металлических покрытий. В работе А. В. Перельмутера [20] отмечается, что аварии неизбежны в силу объективного несовершенства созданных человеком норм. В последнее время появилось значительное количество работ по оценке НДС металлоконструкций с учетом последовательности монтажа, но в этих работах, как и во многих аналогичных, ничего не сказано об учете отклонений при монтаже. В настоящее время учет отклонений выполняется методом статистических испытаний или методом Мора [37]. Для простых систем при расчете точности (определении величин отклонений) можно применить хорошо известные методы теории размерных цепей [38]. Применение методов теории размерных цепей для сложных систем затруднено или невозможно. Использование метода статистических испытаний для определения отклонений и усилий в многоэлементных шарнирно-стержневых статически неопределимых системах не отражает процесса накопления отклонений при сборке.

Следовательно, сегодня требуется разработка методики расчета точности для многоэлементных шарнирно-стержневых систем и оценка влияния отклонений на собираемость, живучесть и НДС стержневых систем. Для обоснования необходимости разработки систем компенсаций (отклонений, усилий) и обеспечения функциональных требований большинства конструкций, в том числе и большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, требуется проверка их НДС с учетом отклонений.

3. Объект, цель и методика исследований

Цель исследования – численная оценка монтажных усилий в шарнирно-стержневом металлическом однопоясном покрытии сферической формы с учетом возможных сборочных отклонений при разных технологических последовательностях сборки. Объект исследования – однопоясное шарнирно-стержневое металлическое купольное покрытие ледового дворца в г. Донецк (рис. 1–2).

Купольное покрытие представляет собой однопоясную оболочку с радиусом нижнего основания 18490 мм из стали С 245. Стрела подъема купола – 10 м. По конструктивному решению основными несущими элементами покрытия являются радиальные ребра, объединенные между собой однопоясной сетью из взаимно пересекающихся стержней. Жесткие меридиональные ребра и однопоясная сеть покрытия совместно воспринимают действующие на них нагрузки. Распор купольного покрытия ледового дворца гасится опорным кольцом. Крепление узлов покрытия с колоннами через внешнее опорное кольцо жесткое. Соединение узлов покрытия между собой принято шарнирным. Исследуемый объект является многократно статически неопределимой системой. Расчет металлоконструкций ледового дворца на восприятие расчетных нагрузок и воздействий, в том числе и монтажных от сборочных отклонений, выполняется методом конечных элементов (МКЭ) с помощью ПК SCAD.

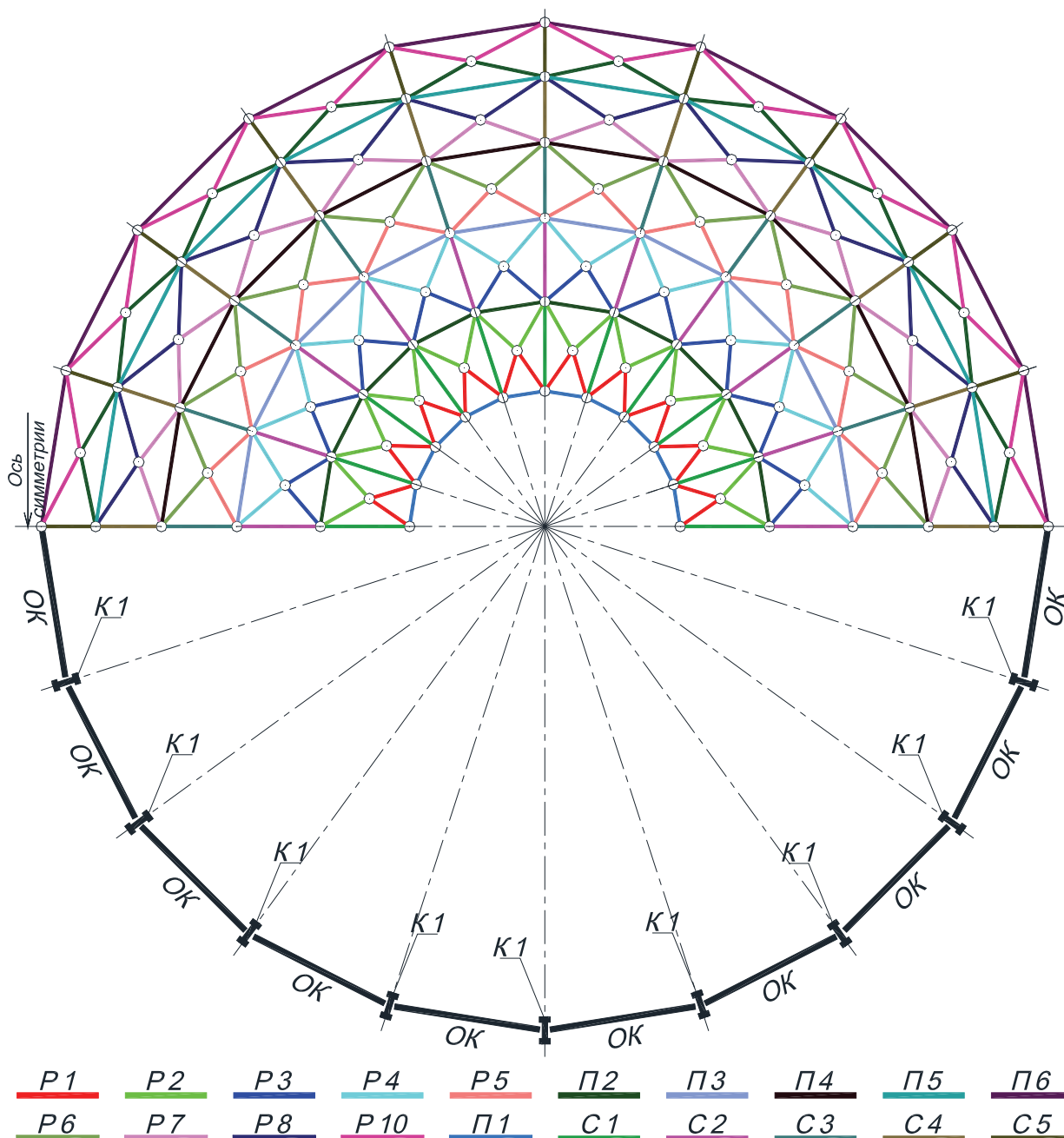


Рисунок 1. Схема расположения элементов покрытия ледового дворца, колонн и опорного контура

При разработке проекта принята поэлементная схема сборки всего купола на подмостях. Затем собранный купол целиком устанавливается в проектное положение стреловым краном. Параллельно со сборкой купола на подмостях выполняется возведение остальных конструкций здания. Поэтому для расчета точности покрытия принята поэлементная сборка. Исследование

сборочных отклонений покрытия подразумевает расчет его точности статистическим методом как пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями. Для определения отклонений (расчета точности) использовалась авторская компьютерная программа – вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» (ВК РАСК) [39]. Расчет точности с помощью ВК РАСК выполняется в такой последовательности:

- определение геометрических размеров покрытия;
- определение линейных размеров отдельных стержней оболочки покрытия;
- ввод координат узлов номинальной формы оболочки;
- назначение допусков в соответствии с выбранным классом точности;
- собственно расчет точности и анализ результатов расчета.

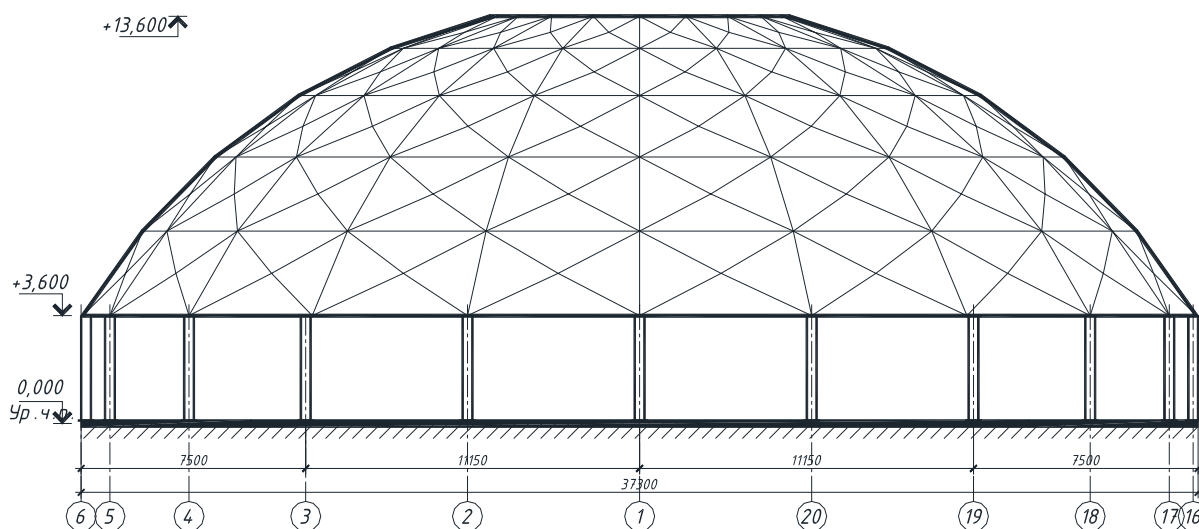


Рисунок 2. Общий вид ледового дворца

В основу ВК РАСК заложен алгоритм геометрического моделирования, основанный на решении таких алгебраических уравнений как пересечение прямой и окружности, двух окружностей, трех сфер и др. Для определения и анализа НДС покрытия с учетом монтажных воздействий выполнен его расчет на восприятие указанных воздействий. Также выполнен статический расчет покрытия на действие эксплуатационных воздействий – постоянной и временной нагрузок для г. Донецк. Моделирование отклонений в стержнях выполнено температурным воздействием, которое действует вдоль замыкающих стержней покрытия. Замыкающие стержни (звенья пространственной размерной цепи) – стержни, вызывающие появление сборочных (монтажных, начальных) усилий при их соединении с ранее собранной частью покрытия. Замыкающие стержни при различной технологической последовательности представлены красным цветом на рисунках 3 и 4.

Монтажная нагрузка – нагрузка от сборочных отклонений, которые определены из расчета точности с помощью ВК РАСК. Величину температурной нагрузки, при которой элемент увеличится в длину, определяем по формуле 4.23 [40]:

$$\Delta t = \delta_i / (\alpha_i \times l_i), \quad (1)$$

где Δt – величина температурного воздействия, необходимая для перемещения стержня на единицу длины;

δ_i – величины перемещения в стержне оболочки, полученные из расчета собираемости;

α_i – коэффициент линейного расширения материала (сталь) стержня, $\alpha_i = 0,12 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$;

l_i – номинальная длина стержня оболочки по проекту.

Ввиду того, что узел примыкания элементов блока покрытия выполнен в виде шарнира, в качестве типа элемента в SCAD принят элемент пространственной фермы. Сечение элементов сети покрытия на начальном этапе принято по гибкости $\lambda = 120$, радиальных ребер – $\lambda = 60$.

4. Анализ результатов исследования отклонений

В результате расчета точности исследуемого покрытия получены отклонения узлов от их проектных значений в нормальном (dZ), меридиональном (dY) и тангенциальном (dX) направлении. Статистическая оценка отклонений производилась на основе 2000 серий испытаний, которые отличались друг от друга последовательностью сборки. Номинальное положение узлов оболочки получено путем обработки файлов формата *.dwg в программе AutoCAD Civil-3D 2013. Расчетная схема купольного покрытия ледового дворца состоит из 219 узлов и 619 стержней. Технологическая схема сборки купольного покрытия в направлении край – центр (КЦ) – вариант 1 – дана на рисунке 3; от центра к краю (ЦК) – вариант 2 – на рисунке 4. Замыкающие стержни – стержни, выполняющие роль замыкающих звеньев в пространственной размерной цепи [38].

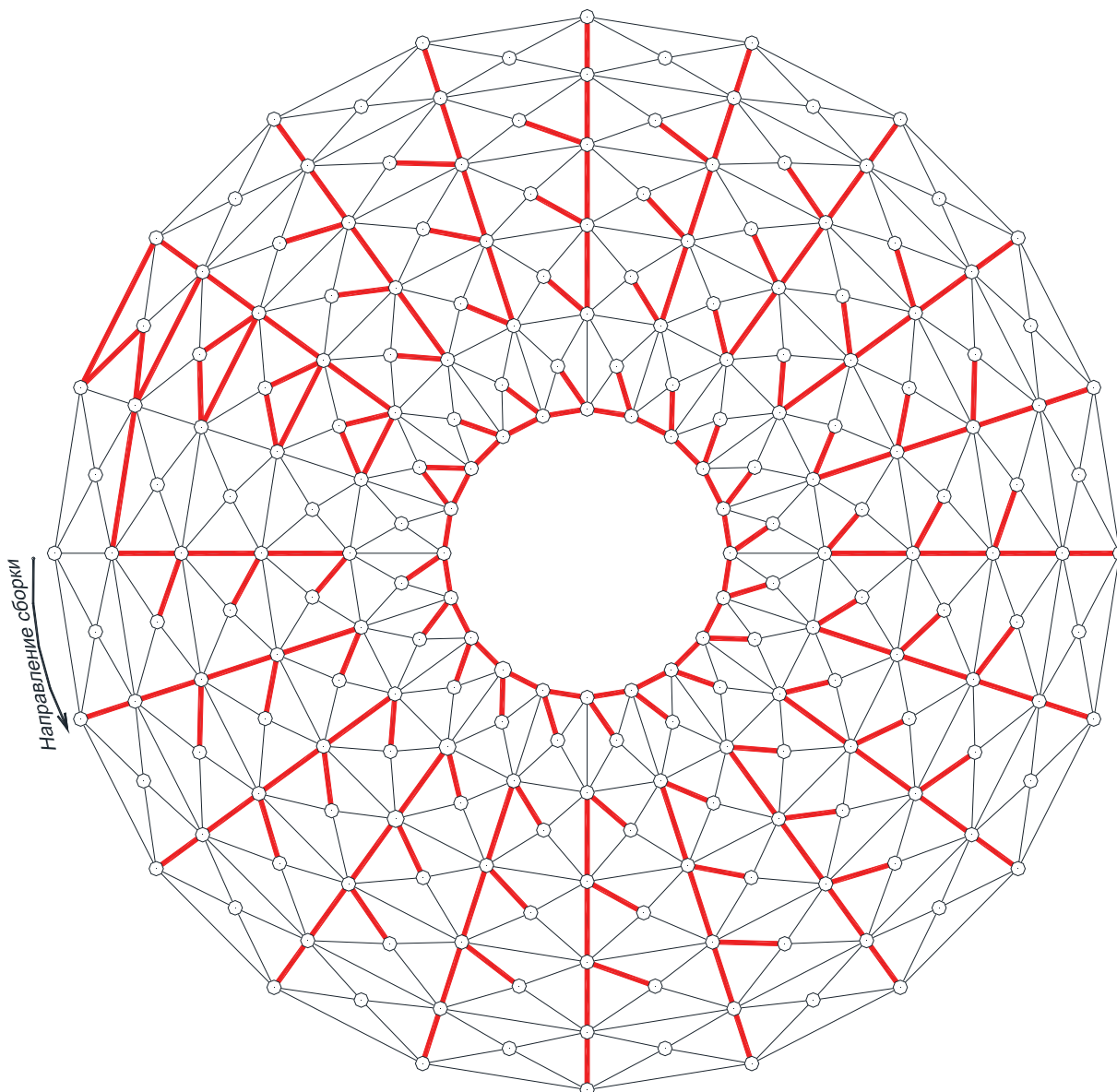


Рисунок 3. Схема расположения замыкающих стержней (звеньев) при сборке покрытия в направлении от опорного контура к центру (КЦ)

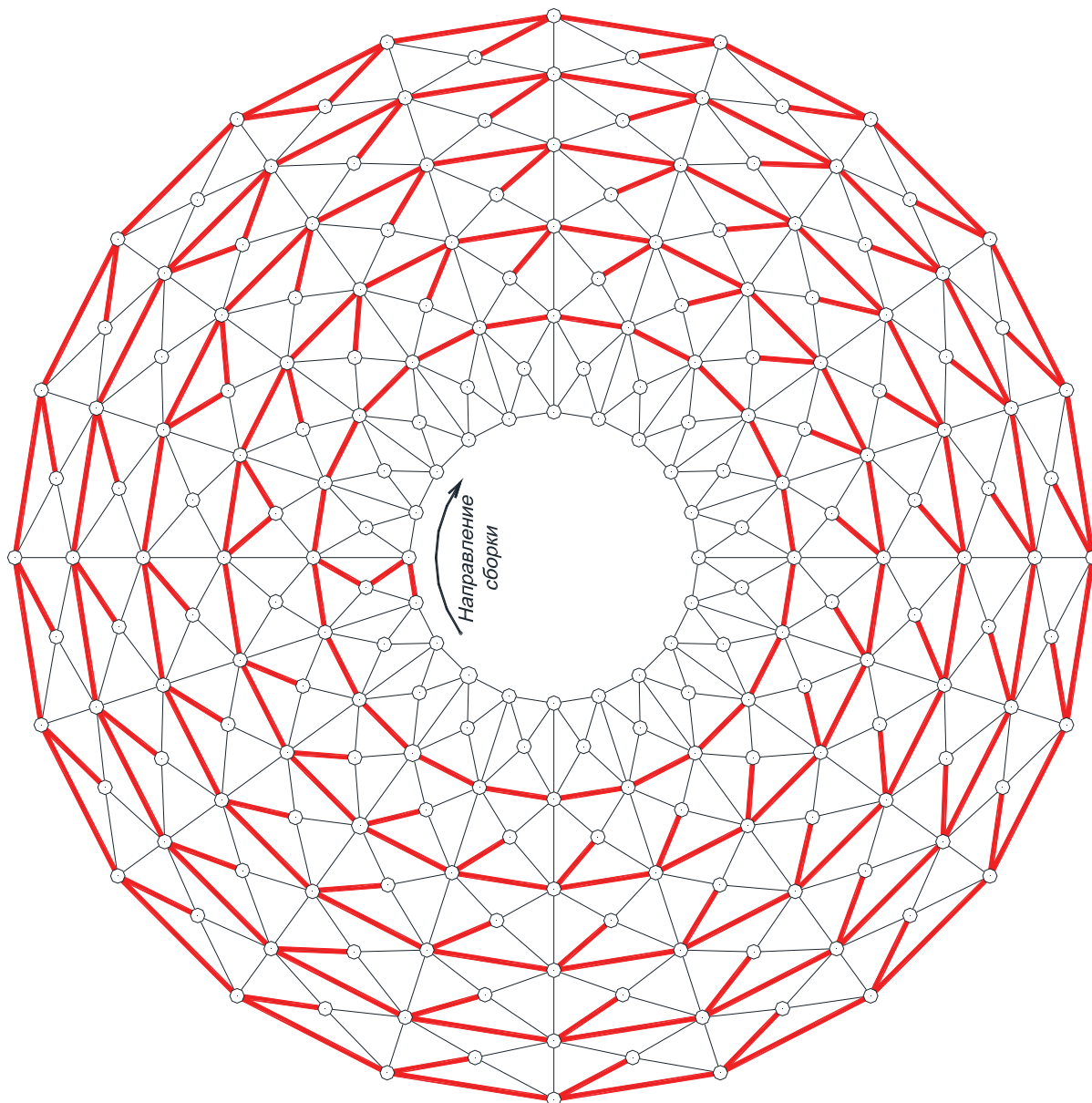


Рисунок 4. Схема расположения замыкающих стержней (звеньев) при сборке покрытия в направлении от центра к краю (ЦК)

Необходимо обратить внимание на то, что точность возведения исследуемого купольного покрытия зависит от точности изготовления всех элементов ввиду того, что они работают и собираются совместно. Поэтому для статистического исследования возможных погрешностей возведения купольного покрытия выполнен расчет точности всего покрытия целиком. Допускаемые отклонения расчетных геометрических параметров приняты по 1–4 классам точности и для линейных размеров конструкций, изготавливаемых в кондукторах согласно [41].

В таблице 1 приведены значения отклонений отдельных узлов и стержней исследуемого покрытия при сборке от края к центру (КЦ) и от центра к краю (ЦК) только согласно [41]. В таблице 1 видно, что увеличение количества узлов в направлении сборки увеличивает отклонения в узлах и стержнях покрытия. В действительности отклонения при сборке покрытия будут тем или иным способом устраняться. Поэтому при исследовании отклонений вводился «режим корректировки отклонений», предусмотренный в ВК РАСК. Применение режима корректировки положения элементов при монтаже покрытия приводит к снижению отклонений от проектного положения как в замыкающих звеньях, так и в остальных элементах оболочки. Наибольшие отклонения наблюдались в нормальном направлении покрытия.

Таблица 1. Предельные отклонения в покрытии при разных технологиях сборки, мм

Узел	СКО dX	СКО dY	СКО dZ	Стержень	Линейное отклонение	Узел	СКО dX	СКО dY	СКО dZ	Стержень	Линейное отклонение
Монтаж КЦ						Изготовление КЦ					
16	74,4	25,4	49,0	135	271,8	16	13,4	4,9	9,3	135	49,6
27	29,4	88,9	44,2	138	289,6	27	5,3	16,1	8,2	138	52,8
23	56,6	61,5	50,7	259	273,3	78	4,7	13,4	10,6	259	50,9
Монтаж ЦК						Изготовление ЦК					
49	180,1	33,0	21,0	539	527,19	46	40,1	5,8	5,5	539	187,62
1	29,7	154,8	14,2	407	499,86	83	25,9	45,6	13,7	407	170,43
163	46,0	31,6	154	275	560,46	163	20,3	7,8	70,3	275	189,36

Наибольшие зазоры имеют узлы в ключе покрытия – это обусловлено накоплением погрешностей при выполнении сборки стержней в конструктивную форму. Для объяснения этого факта в таблице 1 приведена сравнительная информация о предельных величинах зазоров и отклонений узлов в опорной части покрытия и ключе. Из таблицы 1 видно, что предельные величины отклонений по всем направлениям покрытия превышают нормативные значения более чем в 5 раз. Такие величины отклонений обусловлены проявлением процесса неизбежного накопления отклонений в стержнях (блоках) при их сборке. Отклонения узлов при монтаже сооружения по характеру распределения согласуются с нормальным законом распределения. Из результатов расчета точности видно, что с увеличением количества узлов по направлению сборки увеличиваются отклонения в узлах и стержнях покрытия – это вызвано накоплением отклонений при выполнении сборки стержней в конструктивную форму и подтверждает общие положения теории размерных цепей [38].

Наибольшие отклонения выявлены в ключе покрытия. Для обеспечения стопроцентного уровня собираемости исследованного покрытия и снижения сборочных усилий до нуля требуется разработка конструктивно-технологических и других мероприятий в виде системы конструктивно-технологических мероприятий. Однако для обоснования необходимости разработки конструктивных мероприятий дополнительно рекомендуется оценить НДС покрытия с учетом монтажных воздействий – сборочных усилий.

5. Анализ результатов исследования монтажных воздействий

Результаты расчета покрытия приведены для отдельных стержней в виде гистограмм на рисунках 5 и 6. На гистограммах даны усилия от расчетных нагрузок ($N_{эл.}$) и суммарные (N_1 , N_2) – расчетные с учетом монтажных усилий. Поясним обозначения, принятые на гистограммах (рис. 5, 6):

- 1 – усилие в элементе от расчетного действия нагрузок ($N_{эл.}$);
- 2 – усилие в элементе от отклонений изготовления при сборке КЦ (N_1);
- 3 – усилие в элементе от отклонений изготовления при сборке ЦК (N_2).

Несущая способность элемента показана на гистограмме как N_{max} . На гистограммах показано изменение величин сборочных (монтажных) усилий по отношению к несущей способности стержней. Прочность стержня на каждой гистограмме принята равной несущей способности его сечения. Величина сборочного усилия показана в виде суммарного значения N_{max} и N_1 или N_2 (см. рис. 5).

Например, для раскоса P1 величина перегрузки сечения от действия сборочного усилия при сборке КЦ $N_2 = 2,9$, или 190% (рис. 5). В раскосе P1 максимальное усилие от расчетной нагрузки составляет $N_{эл.} = 20$ кН. Максимальная величина монтажного усилия при сборке КЦ составляет $N_{кц} = 530$ кН. Величина суммарного усилия в P1 при сборке КЦ составляет $N_1 = N_{эл.} + N_{кц} = 20 + 530 = 550$ кН, где $N_{кц}$ – усилие в элементе от отклонений изготовления при технологической схеме сборке КЦ. Аналогично определены величины монтажных (сборочных) усилий во всех остальных элементах оболочки. На гистограммах, которые показаны на рисунке 6, обозначения аналогичные.

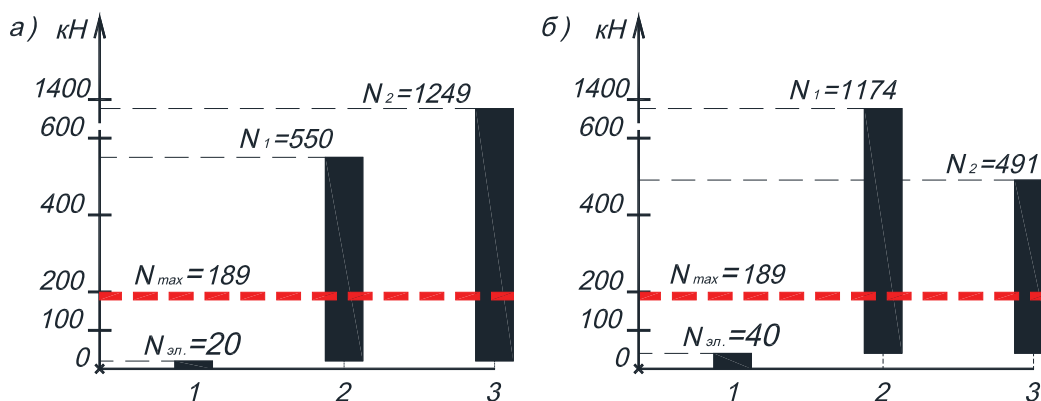


Рисунок 5. Величины усилий: а) в раскосе P1; б) в раскосе P2

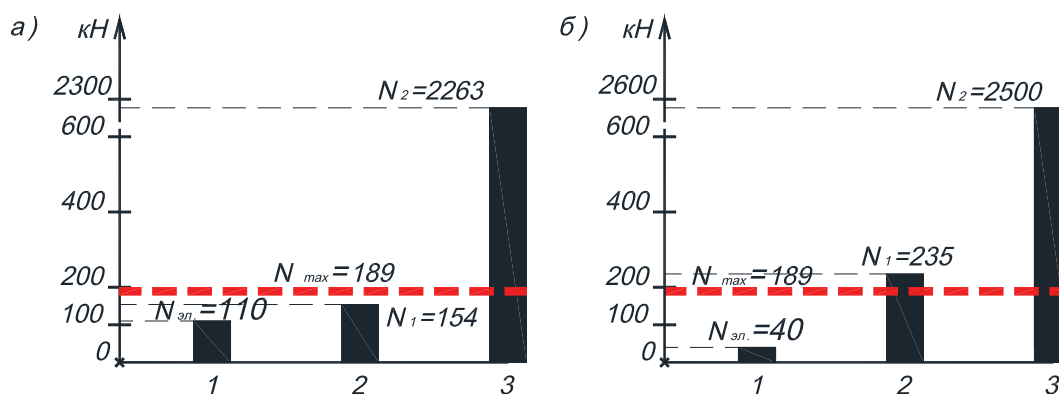


Рисунок 6. Величины усилий: а) в стойке C2, б) в стойке C3

В результате расчета покрытия с учетом сборочных отклонений получены величины сборочных усилий в элементах при сборке от края к центру и от центра к краю. Из анализа результатов расчета установлено, что при монтаже купола появляются элементы несущей способности, которых не достаточно для восприятия суммарного усилия от расчетных и монтажных воздействий, вызванных наличием отклонений. Однако не во всех элементах возникает усилие выше несущей способности элемента.

Следовательно, явное разрушение покрытия не происходит, и потому наличие сборочных усилий в покрытии приводит только к снижению его живучести. При сборке купола по схеме КЦ может разрушиться 163 элемента: P1...P5 – 59 шт., П1...П6 – 104 шт. При сборке по схеме ЦК может разрушиться 124 элемента: P1...P5 – 50 шт., С1...С5 – 74 шт. В связи с этим происходит увеличение деформации и напряжений в оставшихся (работающих) элементах. Однако рекомендуется принять сборку покрытия по схеме ЦК, т.к. при сборке покрытия по схеме КЦ погрешности монтажа больше, чем при сборке по технологии ЦК, а сборочные усилия при обоих вариантах весьма значительные в сравнении с несущей способностью сечения элементов купола. Для исключения влияния отклонений на НДС покрытия предлагается использовать способ монтажа, предложенный авторами [42].

Выводы

1. Разработанная авторская компьютерная программа – вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» для расчета точности стержневых конструкций в вероятностной постановке – позволяет исследовать возможные сборочные отклонения как большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий различных конструктивных схем и способов возведения, так и других шарнирно-стержневых конструкций (систем).

2. В результате численного статистического исследования купольного покрытия получены среднеквадратические значения возможных отклонений в его узлах и стержнях. Установлено, что предельное значение отклонения присутствует при сборке в направлении ЦК и составляет 180,14 мм, а предельное отклонение в замыкающем звене (стержне) зафиксировано при сборке ЦК и составляет 560,46 мм.

3. Для обеспечения собираемости, живучести исследованного покрытия, повышения его несущей способности и снижения трудоемкости сборки требуется разработка конструктивно-Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки

технологических и других мероприятий. Например, рекомендуется использовать способ монтажа, предложенный авторами [42].

Литература

1. ДБН В.1.2-14-2009. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований. К.: Сталь, 45 с.
2. ГОСТ 21778-81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 11 с.
3. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. Том 2. № 17. С. 107–124.
4. Горохов Е.В. Повышение долговечности и надежности металлических конструкций промышленных зданий и сооружений в условиях эксплуатации и реконструкции: Научный доклад доктора технических наук. Днепропетровск: ПГАСА. 90 с.
5. Денисов Е.В. Определение параметров напряженного состояния элементов, эксплуатируемых металлических ферменных конструкций усовершенствованным вибрационным методом: Диссертация кандидата технических наук. Макеевка: ДонНАСА. 2006. 226 с.
6. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4. С. 5–9.
7. Югов А.М., Бондарев А.Б. Оценка живучести однопоясной металлической оболочки покрытия цилиндрической формы вследствие погрешностей изготовления и монтажа // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9(2). Pp. 124–131.
8. Корчак М.Д. Влияние геометрических несовершенств на несущую способность легких металлических конструкций: Автореферат диссертации доктора технических наук. М.: Электросталь, 1993. 39 с.
9. Югов А.М. Действительная работа металлических решетчатых конструкций с несовершенствами: Диссертация кандидата технических наук. Одесса: ОГАСА, 1988. 200 с.
10. Колесников Г.Н. Статический расчет и формообразование несущих каркасов сетчатых оболочек: Автореферат диссертации кандидата технических наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 1982. 21 с.
11. Ватин Н.И., Кузнецов В.Д., Недвига Е.С. Учет погрешностей монтажа при расчете крупнопанельных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 6. С. 35–40.
12. Конин Д.В. Напряженно-деформированное состояние колонн высотных зданий с металлическим каркасом с учетом неточностей монтажа: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидат технических наук / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 2011. 24 с.
13. Сно В.Е. Статистический анализ погрешностей монтажа колонн каркасных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 1984. №6. С. 5–9.
14. Исаев С.В. Методика оценки линейной модели пространственной размерной цепи для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке: Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 2007. 204 с.
15. Кашуба Л.А. Геометрия сборки недеформируемых деталей // Системный анализ в науке и образовании: электронный научный журнал. Дубна. 2011. №4. [Электронный ресурс]. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19> (дата обращения: 15.02.2015).
16. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
17. Кулябко В.В., Банах В.А., Редченко В.П. Проблемы моделирования динамических нагрузок и расчетных схем сооружений, проведения динамических испытаний и анализа их результатов // Башенные сооружения: материалы, конструкции, технологии. 2009. №3(83). С. 84–89.
18. Белостоцкий А.М., Павлов А.С. Комплексное конечноэлементное моделирование НДС и устойчивости сетчатой оболочки покрытия большепролетного сооружения с эластомерными опорами // International journal for computational civil and structural engineering. 2014. Vol. 10(3). С. 64–70.
19. Павлов А.С. Численное моделирование нелинейных процессов разрушения конструкций большепролетных сооружений: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидат технических наук. М.: МГСУ. 2011. 24 с.

20. Перельмутер А.В. Проверка устойчивости конструкций, расчет которых выполняется с учетом стадийности монтажа // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10(4). С. 22–28.
21. Буякас В.И. Статически определимые регулируемые структуры и их приложения в технических задачах космической астрономии: Диссертация доктора технических наук. М.: ФИАН, 2004. 190 с.
22. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А., Поляков С.В., Ульянов С.В. Модели сейсмостойкости сооружений. М.: Наука. 1979. 252 с.
23. Ларионов В.В., Молчанов А.А., Калашников Г.В. Металлические конструкции наземного оборудования, разработанные ЦНИИПСК им. Мельникова для космических стартов // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 10. С. 60–63.
24. Абовский Н.П. Управляемые конструкции. Учебное пособие. Красноярск: КамКрас, 1998. 433 с.
25. Farrar C.R., Worden K., Todd M. D., Park G., Nichols J., Adams D. E., Bement M. T., Farinholt K. Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory, 2007. 143 p.
26. Gantes C.J., Connor J.J., Lwxher R.D., Rosenfeld Y. Structural analysis and design of deployable structures // Computers and Structures. 1989. Vol. 32(3-4). Pp. 661–669.
27. Gaul L., Albrecht H., Wirmitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures // Shock and Vibration. 2004. Vol. 11. Pp. 173–186.
28. Hasan R., Xu L., Grierson D. E. Push-over analysis for performance-based seismic design // Computers and Structures. 2002. № 80. Pp. 2483–2493.
29. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses // Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.
30. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24. №1. Pp. 13–26.
31. Matsumoto K., Wakabayashi S., Noumi M., Yoshida T., Ueno H., Fukase Y. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII // Automation and Robotics in Construction XVI. UC3M. 1999. Pp. 225–230.
32. Keleşoğlu O., Ulker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. 2005. Vol. 80, № 5. Pp. 321–329.
33. Preumont A. Vibration control of active structures: an introduction. 2-nd Edition. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. 385 p.
34. Tokunbo Ogunfunmi Adaptive Nonlinear System Identification. The Volterra and Wiener Model Approaches. USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 229 p.
35. Kim H.M., Bartkovicz T.J. Damage detection and health monitoring of large space structures // Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference. La Jolla, California, April, 1993. Pp. 3527–3533.
36. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System // Journal of Optical Society America. 1977. № 67. Pp. 360–369.
37. Рабинович И. М. Курс строительной механики стержневых систем. Часть II. Статически неопределимые системы. 2-е издание, переработанное. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. 544 с.
38. ГОСТ 21780-2006. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. М.: Издательство стандартов. 13 с.
39. А.с. 47952 Украина. Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК») / А. Б. Бондарев, А. М. Югов (Украина). № 48382; заявлено 20.12.2012; опубликовано 20.02.2013, Бюллетень № 1. 2 с.
40. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1965. 856 с.
41. ДБН В.2.6-163-2011. Строительные материалы и конструкции. Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа. К.: Укрархстроинформ, 2011. 215 с.
42. Пат. №79680 Украина, МПК E04B 1/32; E04B 1/58 Способ монтажа большепролетных стержневых металлических покрытий [Текст] / Бондарев А. Б., Югов А. М.; заявитель и патентообладатель Бондарев А. Б., Югов А.М. № u 2012 13187; заявл. 19.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 1. 5 с.

*Алексей Борисович Бондарев, Макеевка, Украина
Тел. моб.: +7(914)8645290; эл. почта: bondarev_a_b_rus@mail.ru*

*Анатолий Михайлович Югов, Макеевка, Украина
Тел. моб.: +7(931)5797054; эл. почта: amyrus@mail.ru*

© Бондарев А.Б., Югов А.М., 2015

doi: 10.5862/MCE.56.4

Evaluation of installation efforts in metal coatings, allowing for assembly process

A.B. Bondarev,*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
+7(914)8645290; e-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru***A. Yugov,***Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
+7(931)5797054; e-mail: amyus@mail.ru*

Key words

large-span spatial shells; hinged frame structures; installation effects; assembly deviation; assembly errors

Abstract

This article gives an account and analysis of the accuracy of assembly variations in the parameters of the stress-strain state - according to values of assembly (initial) efforts. Deviations are determined by the position of nodes and rods in space relative to their design values.

The article considers two technological schemes of the dome cover assembly - from the edge to the center and from the center to the edge. The accuracy calculation was made with the author's developed computing system "Dimensional analysis of rod structures". Parameters of the stress-strain state of the dome cover, allowing for the accumulation of assembly deviations, were estimated using the computer complex SCAD.

The results of the calculation effort in the shell, taking into account possible assembly deviations, are presented in the form of histograms; and deviations in the nodes and rods are presented in a tabular form. The data on the assembly effort and the deviations are given for individual items. The author suggests constructive solutions for joining rods and installation method for coatings, which are aimed at increasing their load-bearing capacity, longevity and assemblability.

References

1. *DBN V.1.2-14-2009. Sistema obespecheniya nadyozhnosti i bezopasnosti stroitelnykh ob'ektov. Obschie printsipy obespecheniya nadyozhnosti i konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy, sooruzheniy, stroitelnykh konstruksiy i osnovaniy* [Ukrainian Building Codes. System for assurance of reliability and safety of construction projects. General principles of assurance of reliability and structural safety of bulidings, structures and foundations]. Kiev: Stal, 45 p. (rus)
2. *GOST 21778-81. Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov v stroitelstve. Osnovnyye polozheniya* [State standard specification. System for assurance of accuracy of geometrical parameters in construction. General principles]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 11 p. (rus)
3. Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyaev S.V., Poryvaev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. Poisk ratsionalnoy geometricheskoy skhemy prostranstvennoy metallicheskoj konstruksii pokrytiya bolsheproletnogo sportivnogo sooruzheniya [The search of rational shape of spatial metal roof of long-span sport arena]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. Vol. 2(17). Pp. 107–124. (rus)
4. Gorohov E.V. *Povysheniye dolgovechnosti i nadezhnosti metallicheskih konstruksiy promyshlennykh zdaniy i sooruzheniy v usloviyakh ekspluatatsii i rekonstruksii* [Increase of durability and reliability of metal structures of industrial buildings and constructions in terms of operation and reconstruction]: The scientific report of Doctor of Technical Sciences. Dnepropetrovsk, 90 p. (rus)
5. Denisov E.V. *Opredeleniye parametrov napryazhennogo sostoyaniya elementov, ekspluatiruyemykh metallicheskih fermennykh konstruksiy usovershenstvovannym vibratsionnym metodom*. [Defining the parameters of the stress state elements operated metal trusses improved vibration-insulating method]: Ph.D. Dissertation. Makeevka, 2006, 226 p. (rus)
6. Nazarov J.P., Gorodetsky A.S., Simbirkin V.N. K probleme obespecheniya zhivuchesti stroitelnykh konstruksiy pri avariynnykh vozdeystviyakh [To the problem of survivability build-enforcement structures in emergency actions]. *Building mechanics and calculation of structures*. M.: ASV, 2009. Vol. 4. Pp. 5–9.
7. Yugov A.M., Bondarev A.B. *Otsenka zhivuchesti odnopoyasnoy metallicheskoj obolochki pokrytiya tsiilindricheskoy formy vsledstviye pogreshnostey izgotovleniya i montazha* [Evaluation of the

Bondarev A.B., Yugov A. Evaluation of installation efforts in metal coatings, allowing for assembly process

- survivability odnopoyasnoy metal shell cover cylindrical form errors due to the construction and mounting]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. Vol. 9(2). Pp. 124–131. (rus)
8. Korchak M.D. *Vliyaniye geometricheskikh nesovershenstv na nesushchuyu sposobnost legkikh metallicheskih konstruksiy* [Influence of geometrical imperfections on the carrying capacity of light metal structures]: Ph.D. Dissertation. Moscow, 1993. 39 p. (rus)
 9. Yugov A.M. *Deystvitelnaya rabota metallicheskih reshetchatykh konstruksiy s nesovershenstvami* [Real operation of metal grid structures with imperfections]. Ph.D. thesis in Engineering Science. Odessa. 1988. 200 p. (rus)
 10. Kolesnikov G.N. *Staticheskiy raschet i formoobrazovaniye nesushchikh karkasov setchatykh obolochek* [Static calculations and formation of base plates lattice shells]: Ph.D. thesis in Engineering Science. Rostov-on-Don, 1982. 21 p. (rus)
 11. Vatin N.I., Kuznetsov V.D., Nedviga E.S. Installation errors in calculating large-panel buildings [Accounting installation errors in the calculation of large-panel buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6. Pp. 35–40. (rus)
 12. Konin D.V. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye kolonn vysotnykh zdaniy s metallicheskim karkasom s uchetom netochnostey montazha* [The stress-strain state of the columns of high-rise buildings with metal frames with the uncertainties of installation]: Ph.D. Dissertation. Moscow, 2011, 24 p. (rus)
 13. Sno V. Ye. Statisticheskiy analiz pogreshnostey montazha kolonn karkasnykh zdaniy [Statistical analysis of installation errors columns frame buildings]. *Building mechanics and calculation of structures*. 1984, Vol. 6. Pp. 5–9. (rus)
 14. Isaev S.V. Metodika otsenki lineynoy modeli prostranstvennoy razmernoy tsepi dlya obespecheniya vzaimozamenyayemosti obyektov proizvodstva pri sborke [Methodology to evaluate the linear model of the spatial dimension chain to ensure interchangeability of production facilities for assembly]. Ph.D. Dissertation. Moscow, 2007. 204 p. (rus)
 15. Kashuba L.A. Geometriya sborki nedeformiruyemykh detaley [Deformable geometry of the assembly parts]. *System analysis in science and education. Electronic scientific journal*. Dubna. 2011. No.4. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19> (rus)
 16. Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odintsov Ye.V., Kharitonovich A.I., Ponomarev N.B. *Solid Works. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [Solid Works. Computer modeling in engineering practice]. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg. 2005. 800 p. (rus)
 17. Kulyabko V.V., Banakh V.A., Redchenko V.P. Problemy modelirovaniya dinamicheskikh nagruzok i raschetnykh skhem sooruzheniy, provedeniya dinamicheskikh ispytaniy i analiza ikh rezultatov [Problems simulation of dynamic loads and design schemes structures, dynamic testing and analyzing their results]. *The tower structures: materials, design, and technology*. Makeyevka: DonNACEA, 2009, Vol. 3(83). Pp. 84–89. (rus)
 18. Belostotskiy A.M., Pavlov A.S. Kompleksnoye konechnoelementnoye modelirovaniye NDS i ustoychivosti setchatoy obolochki pokrytiya bolsheproletnogo sooruzheniya s elastomernymi oporami [Complex finite element simulation of stress-strain state and stability of braced shell with elastomeric bearings]. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2014. Vol. 10(3). Pp. 64–70. (rus)
 19. Pavlov A.S. *Chislennoye modelirovaniye nelineynykh protsessov razrusheniya konstruksiy bolsheproletnykh sooruzheniy* [Numerical simulation of nonlinear processes of destruction of structures of large-span structures]: Ph.D. Dissertation. Moscow, 2011. 24 p. (rus)
 20. Perelmuter A.V. Proverka ustoychivosti konstruksiy, raschet kotorykh vpolnyayetsya s uchetom stadiynosti montazha [Checking the stability of structures, which is calculated based on the staged installation]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014. Vol. 10(4). Pp. 22–28. (rus)
 21. Buyakas V.I. *Staticheski opredelimyye reguliruyemyye struktury i ikh prilozheniya v tekhnicheskikh zadachakh kosmicheskoy astronomii* [Statically determinate controlled structures and their imposition in engineering problems of space astronomy]: Doctoral Dissertation. Moscow, 2004. 190 p. (rus)
 22. Goldenblat I.I., Nikolayenko N.A., Polyakov S.V., Ulyanov S.V. *Modeli seysmostoykosti sooruzheniy* [Models of Earthquake Engineering]. Moscow: Nauka. 1979. 252 p. (rus)
 23. Larionov V.V., Molchanov A.A., Kalashnikov G.V. Metallicheskiye konstruksii nazemnogo oborudovaniya, razrobotannyye TsNIIPSK im. Melnikova dlya kosmicheskikh startov [Metal Constructions ground equipment, designed, by TsNIIPSK Melnikova for space launches]. *Industrial and civil engineering*. 2005, Vol. 10. Pp. 60–63. (rus)
 24. Abovskiy N.P. *Upravlyayemyye konstruksii* [Controlled design. Textbook]. Krasnoyarsk: KamKras, 1998. 433 p. (rus)

25. Farrar C.R., Worden K., Todd M. D., Park G., Nichols J., Adams D. E., Bement M. T., Farinholt K. *Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance*. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory, 2007. 143 p.
26. Gantes C.J., Connor J.J., Lwxher R.D., Rosenfeld Y. Structural analysis and design of deployable structures. *Computers and Structures*. 1989. Vol. 32(3-4). Pp. 661–669.
27. Gaul L., Albrecht H., Wimitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. Pp. 173–186.
28. Hasan R., Xu L., Grierson D. E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. № 80. Pp. 2483–2493.
29. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.
30. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. №1. Pp. 13–26.
31. Matsumoto K., Wakabayashi S., Noumi M., Yoshida T., Ueno H., Fukase Y. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI*. UC3M. 1999. Pp. 225–230.
32. Keleşoğlu O., Ulker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005. Vol. 80, № 5. Pp. 321–329.
33. Preumont A. *Vibration control of active structures: an introduction. 2-nd Edition*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. 385 p.
34. Tokunbo Ogunfunmi. *Adaptive Nonlinear System Identification. The Volterra and Wiener Model Approaches*. USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 229 p.
35. Kim H.M., Bartkowicz T.J. Damage detection and health monitoring of large space structures. *Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference*. La Jolla, California, April, 1993. Pp. 3527–3533.
36. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. № 67. Pp. 360–369.
37. Rabinovich I. M. *Kurs stroitel'noy mekhaniki sterzhnevyykh sistem. Chast II. Staticheski neopredelimyye sistemy* [The course of structural mechanics of rod systems. Part II. Statically indeterminate system. 2-nd edition, revised]. Moscow: State Publishing House of Literature on construction and architecture, 1954. 544 p. (rus)
38. GOST 21780-2006. Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov v stroitel'stve. Raschet tochnosti. [State standard specification. System for ensuring the accuracy of the geometric parameters in construction. Calculation accuracy] Moscow: Publishing standards. 13 p. (rus)
39. Bondarev A.B., Yugov A.M. *Kompyuternaya programma «Vychislitel'nyy kompleks «Razmernyy analiz sterzhnevyykh konstruktsiy» («VK RASK»)* [Patent. Computer program «Computing system "Dimensional analysis of rod structures"» («CS DARS»)]. Ukraine. No.48382; preference, 20.12.2012; published, 20.02.2013, Ballot papers No.1. 2 p. (rus)
40. Belyaev N. M. *Soprotivleniye materialov*. [Strength of materials] Moscow: Nauka, 1965. 856 p. (rus)
41. DBN B.2.6-163:2011. *Stroitel'nye materialy i konstruktsii. Stal'nye konstruktsii. Normy proektirovaniya, izgotovleniya i montazha*. [Ukrainian Building Codes. The constructions of buildings and structures. The steel constructions. Norms for design, fabrication and erection]. Kiev: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011. 127 p. (rus)
42. Bondarev A.B., Yugov A.M. *Sposob montazha bol'sheproletnykh sterzhnevyykh metallicheskh pokrytij. Pat. Number 79680 Ukraine, IPC E04V 1/32; E04V 1/58* [Installation method of large-core metal coatings]. Patent. № u 2012 13187; 19.11.2012 stated; published 25.04.2013, Bulletin № 1. 5 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 28–37